

**LAS ECUACIONES DE LOCUS  
Y EL PUNTO DE ARTICULACIÓN EN ESPAÑOL**

**E. MARTÍNEZ CELDRÁN Y XAVIER VILLALBA**  
*Laboratori de Fonètica, Facultat de Filologia,*  
*Universitat de Barcelona*

## RESUMEN

Este artículo explora las posibilidades que ofrecen las *ecuaciones de locus* para la clasificación de las consonantes oclusivas en función de su punto de articulación. Las ecuaciones de locus, diseñadas originalmente por Lindblom (1963), son funciones lineales obtenidas a partir de la regresión entre dos valores del F2 de la vocal postconsonántica: los valores de F2 del primer pulso glotal y los valores de F2 del centro del formante. Los resultados de un experimento con diez informantes (cinco hombres y cinco mujeres), que produjeron una serie de estímulos con [p]-[b], [t]-[d], [k]-[g] para cada una de las cinco vocales del español, mostraron que a pesar de la existencia de diferencias individuales y de coarticulación cada punto de articulación (labial, dento-alveolar y velar) presenta una ecuación de locus claramente definida que lo identifica. Un análisis discriminativo posterior confirmó este hecho: usando bien la pendiente y la intersección con la *y* juntas o la pendiente sola, se obtuvo una clasificación del 100%. Parece que existe pues por encima de la variación intrínseca al habla unos invariantes acústicos que darían cuenta del hecho comunicativo.

## ABSTRACT

This paper explores the possibilities offered by *locus equations* for classifying stop consonants regarding place of articulation. Locus equations, originally conceived by Lindblom (1963), are linear functions obtained from a correlation between two F2 values of the postconsonantal vowel: F2 values at the first glottal pulse and the F2 values at the midvowel nucleus. An experiment with ten subjects (five male and five female), which produced a series of [p]-[b], [t]-[d], [k]-[g] tokens for the 5 Spanish vowels, showed that, beyond individual and coarticulation variation, each place is sharply identified by a locus equation. A later discriminant analysis confirmed this point: using either both slopes and *y* intercepts or slopes alone, a 100% correct classification followed. It seems thus that beyond the variation inherent to speech acts there are acoustic invariants explaining the communicative fact.

## 1. LAS ECUACIONES DE LOCUS<sup>1</sup>

### 1.1. El concepto de 'ecuación de locus'

Las ecuaciones de locus fueron 'descubiertas' por Lindblom (1963). En ese estudio Lindblom mostraba la existencia de una relación muy estrecha entre los valores del F2 en el segmento inicial de la vocal postconsonántica [de ahora en adelante, F2<sub>i</sub>] y los valores de F2 en el periodo estable (F2<sub>v</sub>). La expresión matemática de tal hecho era la regresión: la proyección de los valores de F2<sub>i</sub> sobre los de F2<sub>v</sub> daba una serie de funciones lineales, las ecuaciones de locus, con la forma siguiente

$$F2_i = k * F2_v + c$$

donde *k* es la pendiente y *c* la intersección de la línea de regresión con el eje de la ordenada. Los valores de *k* y de *c* estaban claramente diferenciados para cada punto de articulación (en este caso para las consonantes suecas [b], [d] y [g]), con lo cual las ecuaciones de locus podían convertirse en un buen método descriptivo. Con todo, el trabajo pionero de Lindblom no perseguía más que mostrar la sistematicidad que la dependencia del contexto imponía en la relación entre F2<sub>i</sub> y F2<sub>v</sub>. El autor no pretendía en ningún caso que sus ecuaciones de locus fueran un correlato acústico del punto de articulación. Sin embargo, estudios más recientes (por ejemplo Sussman et alii. 1991, Sussman et alii 1993), donde se retoma la idea de las ecuaciones de locus tras un largo periodo de olvido, muestran que, aunque estas no ofrecen (de momento) suficientes pistas acústicas invariantes absolutas para identificar el punto de articulación de las consonantes oclusivas, sí que nos dan una descripción precisa de los invariantes relativos que subyacen a cada punto de articulación. Es decir, a pesar de que las ecuaciones de locus no nos permiten (aún) predecir con exactitud el punto de articulación de una consonante oclusiva concreta, sí que nos enseñan con gran precisión que la relación entre F2<sub>i</sub> y F2<sub>v</sub> es invariante para

---

<sup>1</sup> Este trabajo es una versión ampliada y modificada de la comunicación presentada en el *XIIIth International Congress of Phonetic Sciences* de Estocolmo. Los autores están en deuda con O. Julià, L. Rallo y H. Sussman por su ayuda en la elaboración de este trabajo. También quieren dejar constancia de la ayuda financiera recibida del Ministerio de Educación y Ciencia a través de las becas PB91-0278 (DGICYT) adjudicada a Eugenio Martínez Celdrán y AP92-46654991 adjudicada a Xavier Villalba.

cada punto de articulación por encima de los efectos de la coarticulación.

### **1.2. Las ecuaciones de locus y el 'locus clásico'**

Una ecuación de locus es pues una función lineal que relaciona  $F2_i$  y  $F2_v$  y expresa con su forma (es decir con los valores de  $k$  y de  $c$ ) los efectos que el punto de articulación ejerce sobre los citados valores. Pero, ¿qué relación tiene con el concepto tradicional de 'locus'?

El concepto de 'locus' tiene una larga tradición fonética desde los estudios pioneros de Delattre et alii. (1955) en los Laboratorios Haskins. Estos autores observaron que, a pesar de los efectos de coarticulación, las transiciones vocálicas presentaban ciertas regularidades: las transiciones 'apuntaban' hacia ciertos puntos fijos (los 'loci') en función del punto de articulación. El 'locus tradicional' es pues un punto imaginario hacia donde se dirigen las transiciones vocálicas. Cada punto de articulación presenta un valor concreto en Hz. Por ejemplo, según los análisis tradicionales el locus (bi)labial es de unos 700 Hz, el dental de unos 1700 Hz, y el velar de unos 3000 Hz. (Martínez Celdrán, 1984).

Así pues, la concepción del locus clásico y la de las ecuaciones de locus es notablemente distinta. En el primer caso nos hallamos ante un invariante absoluto, un valor fijo que identificaría cada punto de articulación. En el caso de las ecuaciones de locus, en cambio, no se trata tanto de un invariante absoluto como de uno relativo y relacional: los valores de las ecuaciones de locus reflejan cómo cada punto de articulación 'regula' la variación inducida por el contexto. Las ecuaciones de locus, pues, nos ofrecen un resultado más modesto que el locus tradicional. Con todo, su gran mérito está en expresar en una función matemática, obtenible directamente de la señal acústica, los aspectos invariantes que subyacen a la coarticulación. De esta forma, las ecuaciones de locus dan nuevos bríos a la teoría de la invariación acústica contra la posición de la teoría motora del habla (Liberman et alii 1967; Liberman y Mattingly 1985), que defiende la inexistencia de invariantes acústicos en la señal sonora.

## **2. MÉTODO**

### **2.1. Material de análisis**

Nuestro estudio se basó en el habla de cinco informantes masculinos y cinco femeninos de edades comprendidas entre los 18 y los 30 años. Los informantes produjeron la secuencia [kan'CVna], donde C = {[p], [b], [t], [d], [k], [g]} y V = {[i], [e], [a], [o], [u]}, cinco veces para cada vocal. Obtuvimos pues un total de 150 estímulos por hablante (6 oclusivas × 5 vocales × 5 repeticiones = 150). Todos los estímulos se grabaron en una cabina insonorizada mediante un micrófono "Shure SM58" y una grabadora Marantz, modelo CP430.

### **2.2. Análisis**

Todos los análisis se llevaron a cabo con el laboratorio fonético computerizado CSL 4300 B de la casa Kay Elemetrics. Los valores de F2 se obtuvieron mediante cursor sobre un espectrograma de banda ancha sobre el que se sobreponían los valores de la derivación de LPC de los formantes.

Teniendo en cuenta que las consonantes oclusivas del español no son aspiradas, tomamos como valor de F2<sub>i</sub> el primer pulso glotal discernible después de la explosión. El valor de F2<sub>v</sub> se tomaba en el centro del periodo estable de la vocal cuando la trayectoria del formante era ascendente o descendente y en los valores mínimos y máximos del formante cuando éste presentaba una forma descendente-ascendente o ascendente-descendente respectivamente.

## **3. RESULTADOS**

A partir de los datos obtenidos generamos 30 ecuaciones de locus (3 puntos de articulación × 10 hablantes). Para ilustrar mejor el concepto, a continuación se reproducen tres proyecciones de un mismo hablante correspondientes a cada uno de los tres puntos de articulación.

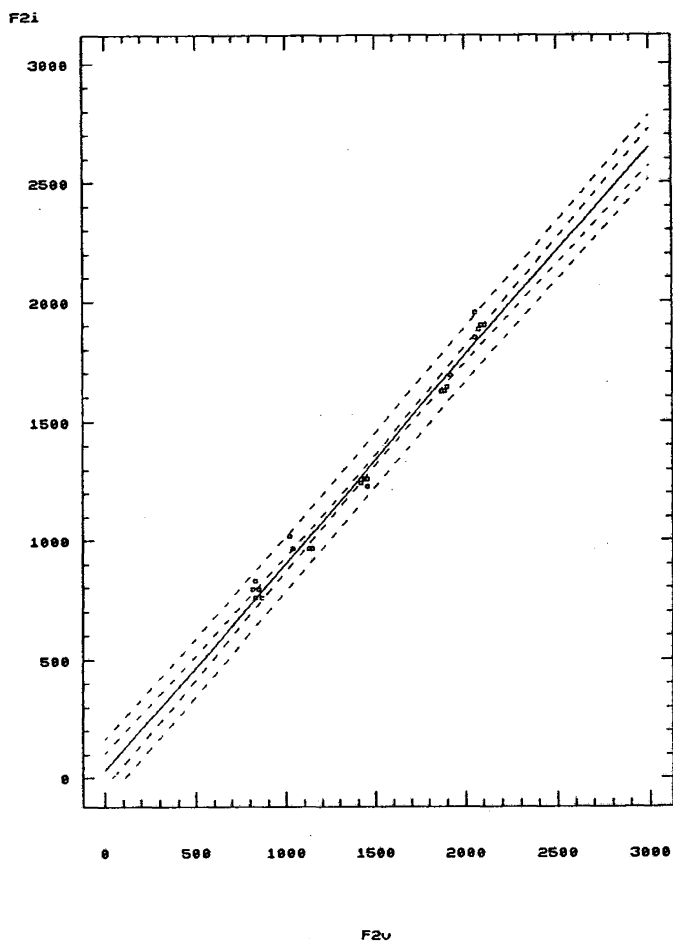


Fig. 1. Ecuación de locus para [p] de un hablante masculino.  
 $y = 0,87x + 33$

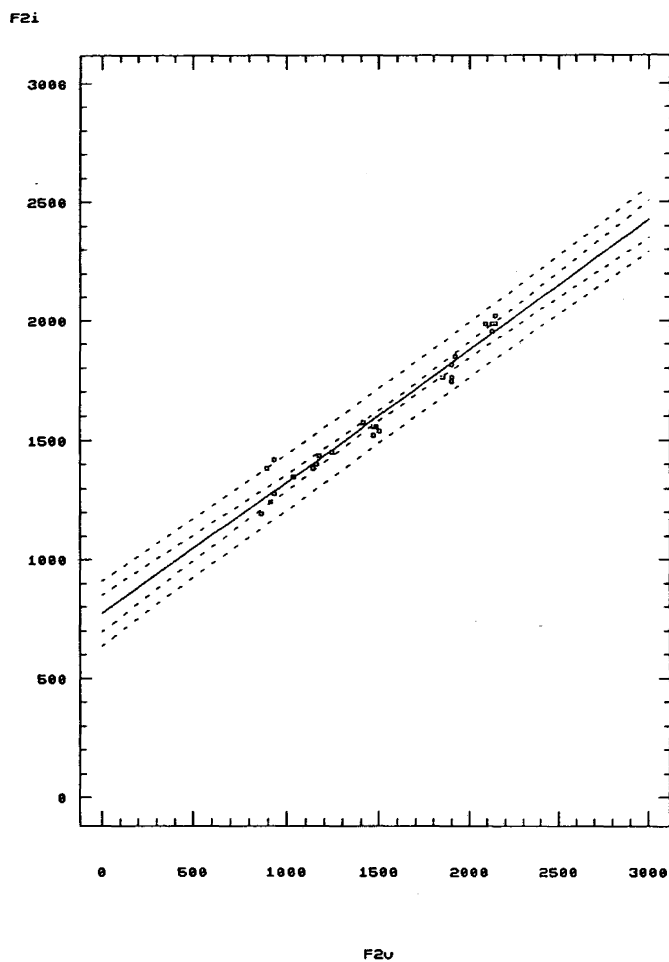
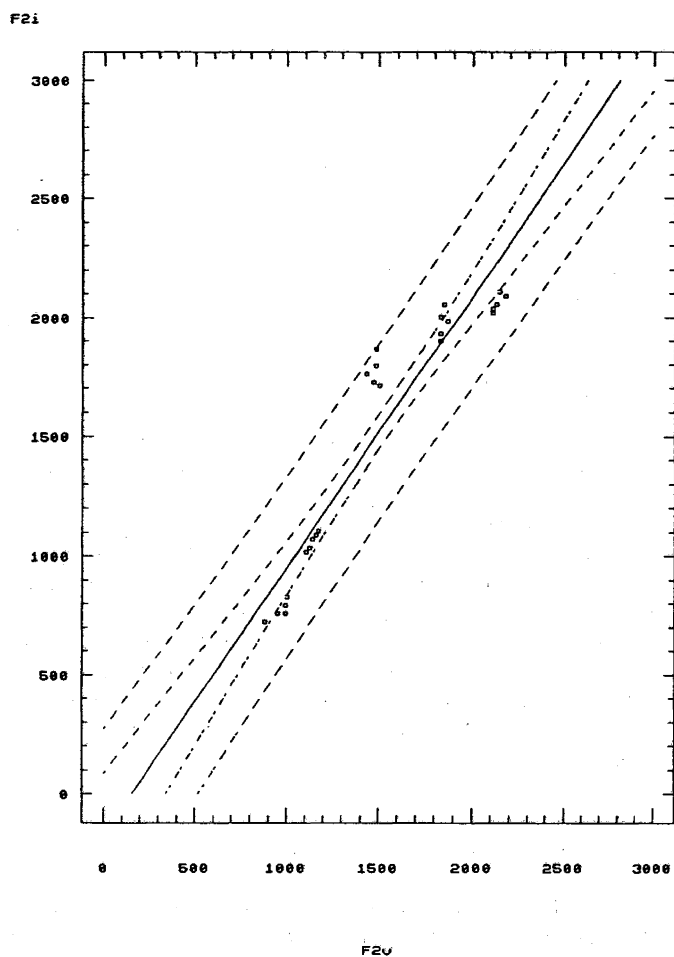


Fig. 2. Ecuación de locus para [t] de un hablante masculino.  
 $y = 0,55x + 773$



**Fig. 3.** Ecuación de locus para [k] de un hablante masculino.  
 $y = 1,13x - 178$

En la Tabla 1 se ofrecen los resultados.



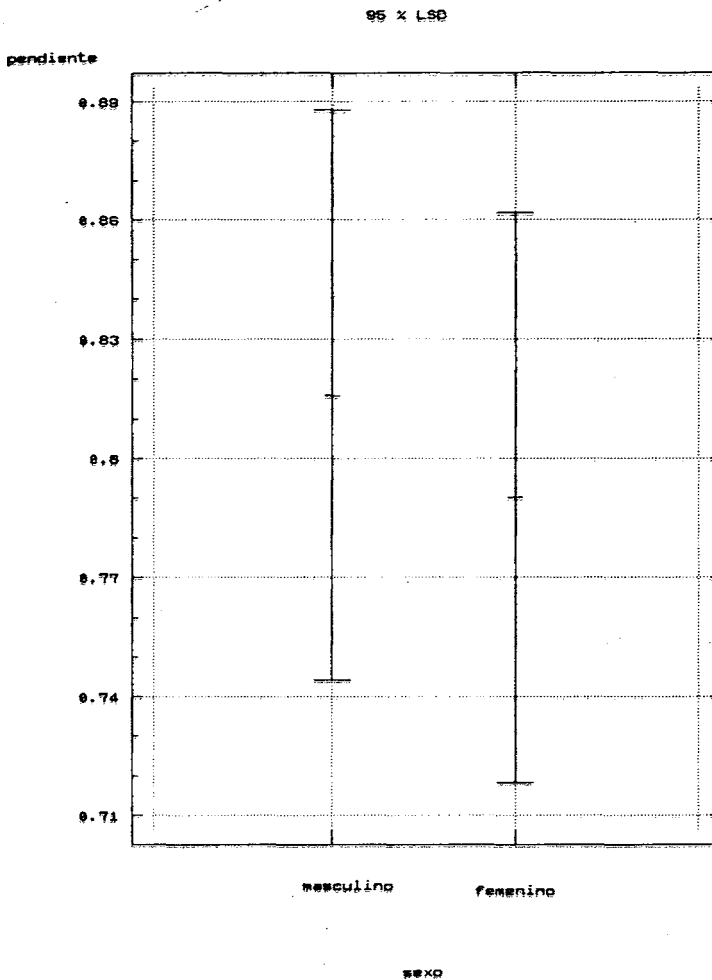
*Tabla 1. Valores de la pendiente y de la intersección con la ordenada para todos los hablantes y para todos los puntos de articulación.*

	/p/-b/ pendiente	intercep ción	/t/-d/ pendiente	intercep ción	/k/-g/ pendiente	intercep ción
M1	0,74	224,42	0,59	606,83	0,93	65,62
M2	0,79	151,06	0,69	516,53	0,95	60,7
M3	0,90	-1	0,52	803,27	1,19	-242,74
M4	0,88	45,04	0,65	545,86	1,12	-167,64
M5	0,81	195,56	0,51	829,94	0,97	74,43
F6	0,87	71,62	0,64	706,28	0,95	149,37
F7	0,83	134,33	0,63	662,41	0,99	5,66
F8	0,82	94,96	0,53	920,51	0,99	79,54
F9	0,80	241,86	0,53	966,08	1,01	42,13
F10	0,84	102,99	0,50	899,88	0,92	227,21
<b>x</b>	<b>0,83</b>	<b>126,08</b>	<b>0,58</b>	<b>745,76</b>	<b>1</b>	<b>29,43</b>
<b>s</b>	<b>0,05</b>	<b>78,7</b>	<b>0,07</b>	<b>161</b>	<b>0,09</b>	<b>139</b>

Como se puede ver, las medias ofrecen unos valores bien diferenciados para cada punto de articulación tanto para la pendiente como para la intersección con la ordenada. Resulta bastante claro también que los valores de las medias tanto de las pendientes como de la intersección con la ordenada son sobradamente significativas, con una excepción: la media de la intersección con la ordenada de las velares. En general, los valores de la intersección con la ordenada presentan una gran variabilidad. Para ver hasta que punto la variabilidad tenía una causa concreta desarrollamos análisis estadísticos concretos de los valores de la pendiente y de la intersección con la ordenada, que presentamos en los siguientes subapartados.

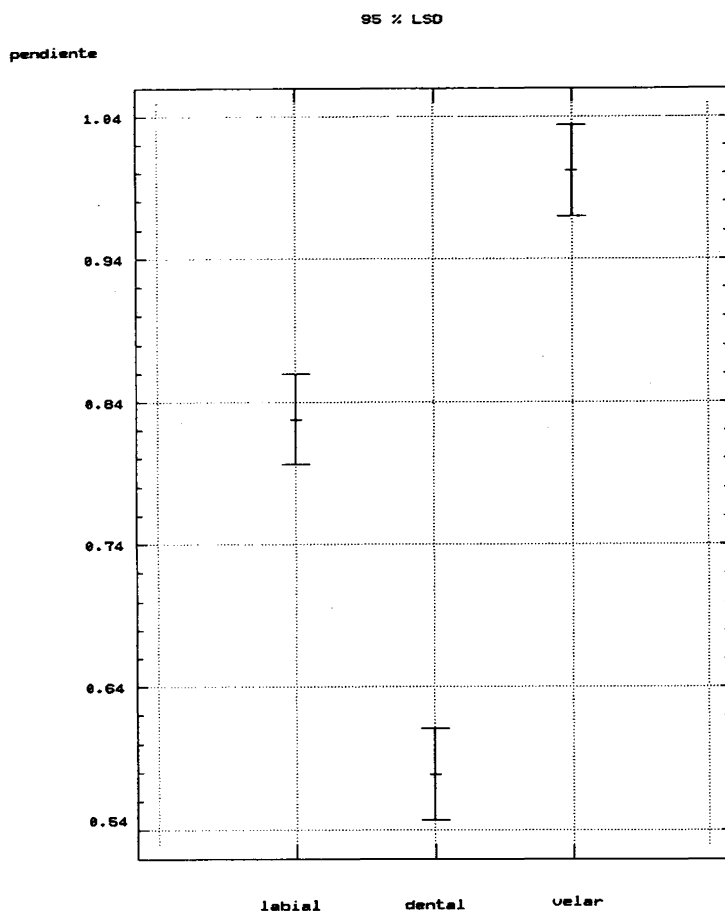
### 3.1. Variación de la pendiente

Para comprobar el grado de variación de los valores de la pendiente y sobre todo si tal variación respondía a factores concretos, desarrollamos dos ANOVAS. La primera comparaba los valores de la pendiente en función del sexo de los hablantes y no mostró ninguna diferencia significativa:  $F(1,28) = 0,138$ ,  $p < 0,7172$ . La proyección de las medias se ofrece en la Fig. 4.



*Fig. 4. ANOVA de los valores de la pendiente en función del sexo.*

La otra ANOVA comparaba los valores de la pendiente en función del punto de articulación y sí que encontró una diferencia significativa ( $F(2,27) = 93,013$ ,  $p < 0$ ), como queda reflejado en la proyección de las medias de la Fig. 5.



*Fig. 5 ANOVA de los valores de la pendiente en función del punto de articulación.*

La significación del factor de punto de articulación quedó confirmada por las ANOVAs realizadas entre pares de puntos de articulación, ya que todas ofrecieron diferencias significativas: labial vs. dental dio  $F(1,18) = 88,22$ ,  $p < 0,01$ ; labial vs. velar,  $F(1,18) = 30,92$ ,  $p < 0,01$ ; y finalmente dental vs. velar  $F(1,18) = 145,01$ ,  $p < 0,01$ . En resumen, todas las pruebas estadísticas dieron como resultado que la variación de la pendiente no estaba afectada significativamente por el sexo y sí por el punto de articulación.

Por otro lado, los valores de la pendiente a pesar de la variación, no presentaban en ningún caso solapamiento entre puntos de articulación: el rango de la pendiente era de 0,74-0,9 para las labiales, de 0,5-0,69 para las dentales, y de 0,92-1,19 para las velares (véase la Fig. 6). Este hecho es de gran importancia para asegurar una correcta clasificación de las consonantes, como se pondrá de manifiesto en el subapartado 3.3.

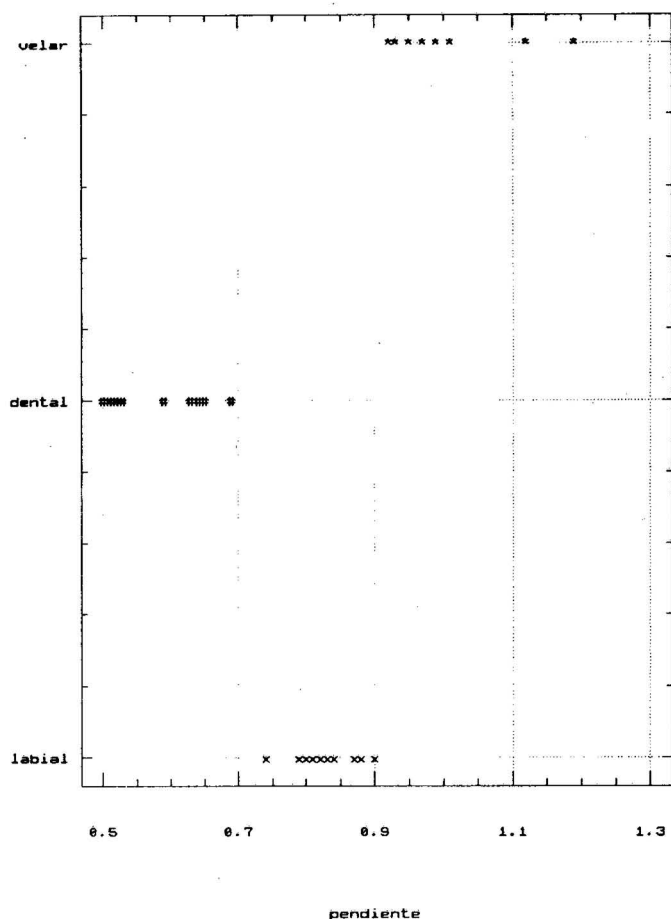


Fig. 6. Distribución de los valores de la pendiente en función del punto de articulación.

### 3.2. Variación de la intersección con la ordenada

De nuevo, a pesar de la gran variabilidad de los valores de la intersección con la ordenada, las ANOVAs no mostraron efectos significativos en función del sexo [ $F(1,28) = 0,699$ ,  $p < 0,419$ ; véase también la Fig. 7), pero sí en función del punto de articulación [ $F(2,27) = 88,024$ ,  $p < 0$ ; véase también la Fig. 8].

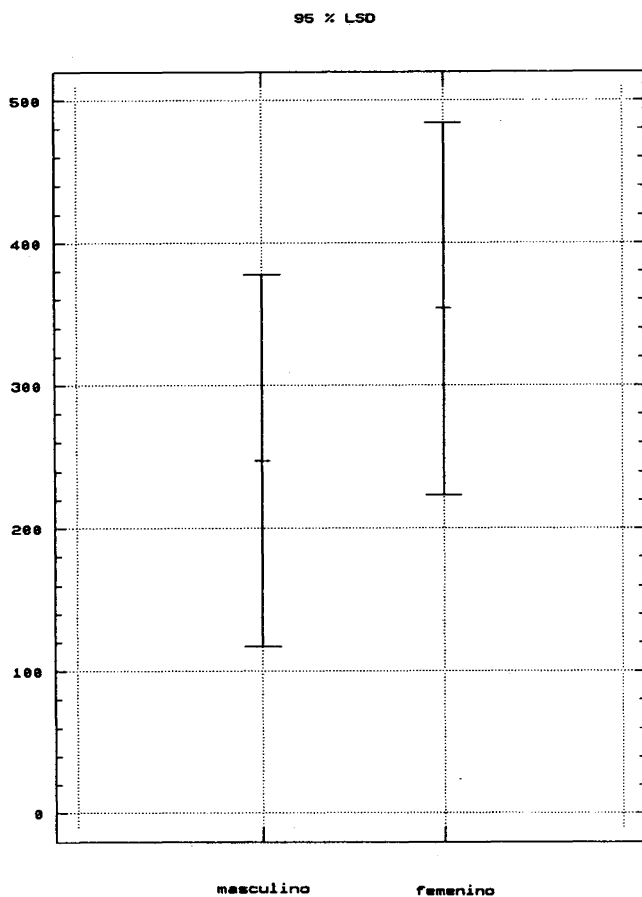
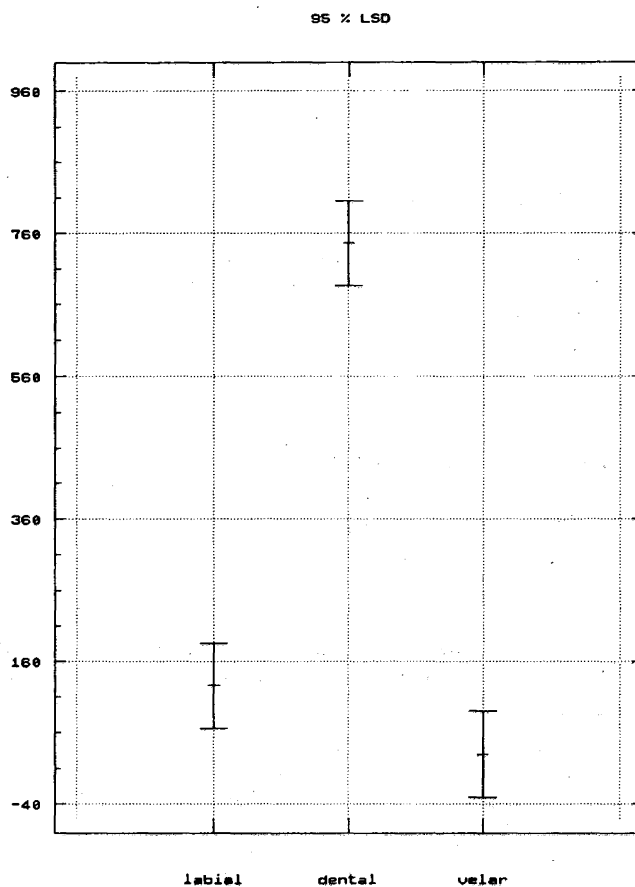


Fig. 7. ANOVA de los valores de la intersección con la ordenada en función del sexo.



*Fig. 8. ANOVA de los valores de la intersección con la ordenada en función del punto de articulación.*

Se confirma pues lo expuesto en el apartado 3.1.: aun cuando los valores de la pendiente y [especialmente] de la intersección con la ordenada presentan variación, esta no se debe a factores externos (sexo) sino a factores fonéticos (punto de articulación).

### 3.3. Análisis discriminante

Para ver hasta qué punto nuestras ecuaciones de locus eran pertinentes para una clasificación de los tres puntos de articulación, llevamos a cabo un análisis discriminante de *todas* las ecuaciones (3 puntos de articulación  $\times$  10 hablantes = 30 ecuaciones de locus) y con el punto de articulación como clasificador. El análisis discriminante tuvo en cuenta tanto la pendiente como la intersección con la ordenada. Ello nos dio los valores para los centroides que muestra la Tabla 2 y los resultados de clasificación de la Tabla 3.

Tabla 2. Valores de los centroides.

	<i>pendiente</i>	<i>intersección</i>
<i>labial</i>	-0,64441	-2,22033
<i>dental</i>	3,33531	0,75402
<i>velar</i>	-2,6909	1,46631

Tabla 3. Clasificación usando la pendiente y la intersección con la ordenada. El eje vertical indica los grupos reales y el horizontal, los grupos predichos.

	<i>labial</i>	<i>dental</i>	<i>velar</i>	<i>total</i>
<i>labial</i>	100%	0%	0%	<b>100%</b>
<i>dental</i>	0%	100%	0%	<b>100%</b>
<i>velar</i>	0%	0%	100%	<b>100%</b>

Como se puede apreciar en la Tabla 3, la clasificación fue perfecta usando la pendiente y la intersección con la ordenada como valores. Ello puede verse de forma más gráfica en la Fig. 9:

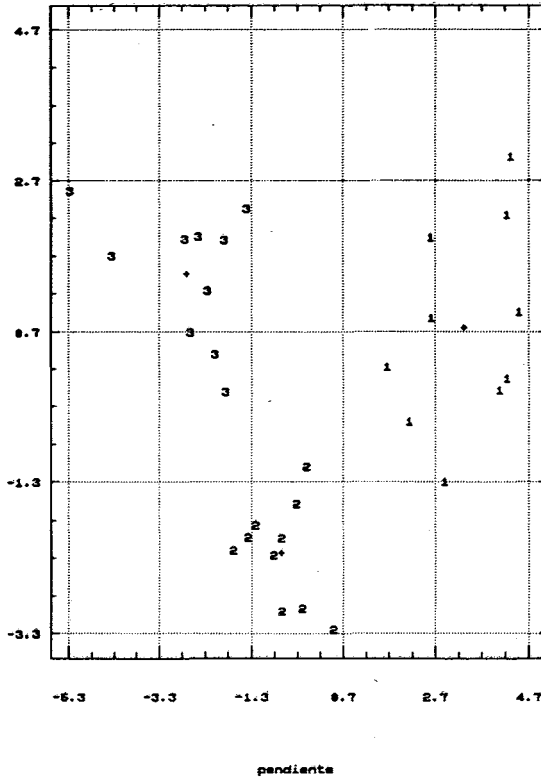
Las ecuaciones de locus y el punto de articulación...

Fig. 9. Proyección de los grupos y centroides (+) del análisis discriminante usando la pendiente y la intersección con la ordenada (1 = dental, 2 = labial, 3 = velar).

En ningún caso se aprecia solapamiento entre los puntos de articulación, lo cual no es sorprendente si tenemos en cuenta lo visto en el apartado 3.1.: el rango de las pendientes no presentaba solapamiento en ningún caso.

El análisis discriminante también clasificó perfectamente los valores de las ecuaciones de locus cuando tomamos solamente en consideración la pendiente (los valores de los centroides fueron 0,35862 para las labiales, -3,21326 para las dentales y 2,85464 para las velares). En cambio, la pendiente por ella sola (los centroides fueron -1,33097 para las labiales, 3,39932 para las dentales y -



2,06834 para las velares] no pudo clasificar perfectamente los valores de las ecuaciones: aunque obtuvo un 100% para las dentales, clasificó un 30% de las labiales como velares y a la inversa, un 30% de las velares como labiales, lo cual nos daba una media de clasificación correcta del 80%.

## 4. DISCUSIÓN

### 4.1. El espacio acústico intralingüístico

El experimento muestra como los tres puntos de articulación de las consonantes oclusivas del español quedan perfectamente descritos mediante las ecuaciones de locus. Se puede decir que las ecuaciones de locus caracterizan un espacio acústico nítido, donde cada punto de articulación tiene una distribución bien definida. Considérese la proyección siguiente:

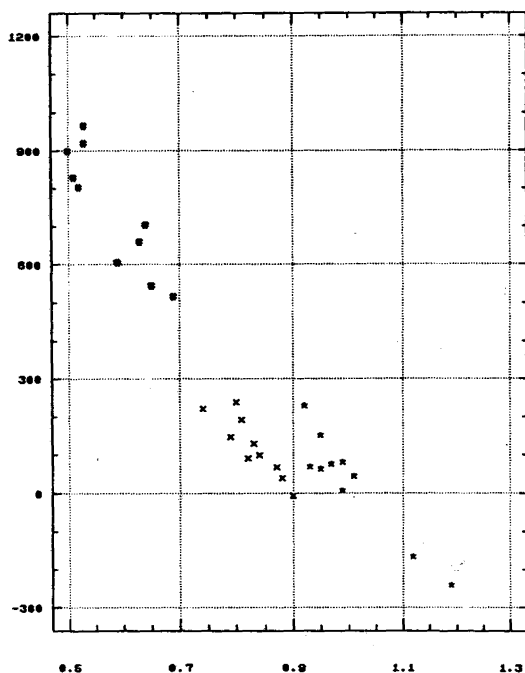


Fig. 10. Espacio acústico de las oclusivas del español ('x' = labial, '#' = dental, '\*' = velar).

Como se ve, cada punto de articulación presenta una distribución nítida en el espacio acústico, sin que en ningún caso se produzcan interferencias.

#### **4.2. El espacio acústico interlingüístico**

Nuestros resultados fueron comparables a los obtenidos por Sussman et alii (1991) para el inglés y Sussman et alii (1993) para diferentes lenguas. Es interesante pues poner en relación los resultados de estos dos trabajos con los datos obtenidos para el español. El objetivo no sería otro que situar las consonantes oclusivas del español en lo que estos autores llaman 'el espacio acústico'. De esta manera podríamos constatar cuál es la distribución de los puntos de articulación a través de las lenguas y por tanto si los valores de las ecuaciones de locus obtenidos se deben al azar o si por el contrario responden a un fenómeno invariante consistente. Para ello nos servimos de los valores que dan Sussman et alii (1993) para cinco lenguas de familias bien distintas y que aparecen junto a los datos para el español en la tabla siguiente:<sup>1</sup>

*Tabla 4. Comparación interlingüística de las medias de las pendientes.*

	<i>labial</i>	<i>dento-alveolar</i>	<i>velar</i>
<i>español</i>	0,83	0,58	1
<i>tai</i>	0,70	0,3	
<i>inglés</i>	0,87	0,43	0,66
<i>sueco</i>	0,63	0,32	0,95
<i>árabe</i>	0,77	0,25	0,92
<i>urdú</i>	0,81	0,5	0,97
<b><i>media</i></b>	<b>0,77</b>	<b>0,39</b>	<b>0,9</b>

La gráfica con los datos de la Tabla 4 aparece a continuación:<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Los datos del tai, árabe y urdú son de Sussman et alii (1993); los del inglés, de Sussman et alii (1991); y los del sueco, de Lindblom (1963) y de Krull (1988).

<sup>2</sup> Los valores de la pendiente para las velares del inglés (en realidad sólo para [g]) son claramente anómalos, como reconocen Sussman et alii (1993), por

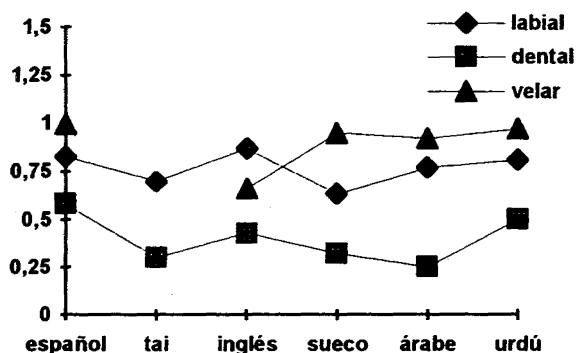


Fig. 11. Distribución de los valores de la pendiente.

Los valores de la pendiente para las oclusivas labiales y las velares del español son muy consistentes con los de las demás lenguas comparadas. Únicamente los valores para las dento-alveolares se alejan significativamente. La razón de tal disparidad podría radicar en la especial articulación de estas consonantes oclusivas en español: [t] y [d] son claramente dento-alveolares, a diferencia de lo que ocurre en, por ejemplo, inglés, donde su articulación es alveolar pura. La confirmación de este hecho proviene de los datos del urdú, una lengua con oclusivas dentales y alveolares. Según Sussman et alii (1993) el valor de la pendiente era de 0,44 para las alveolares y de 0,50 para las dentales, que por tanto se encuentran más cercanas a las oclusivas dento-alveolares del español.

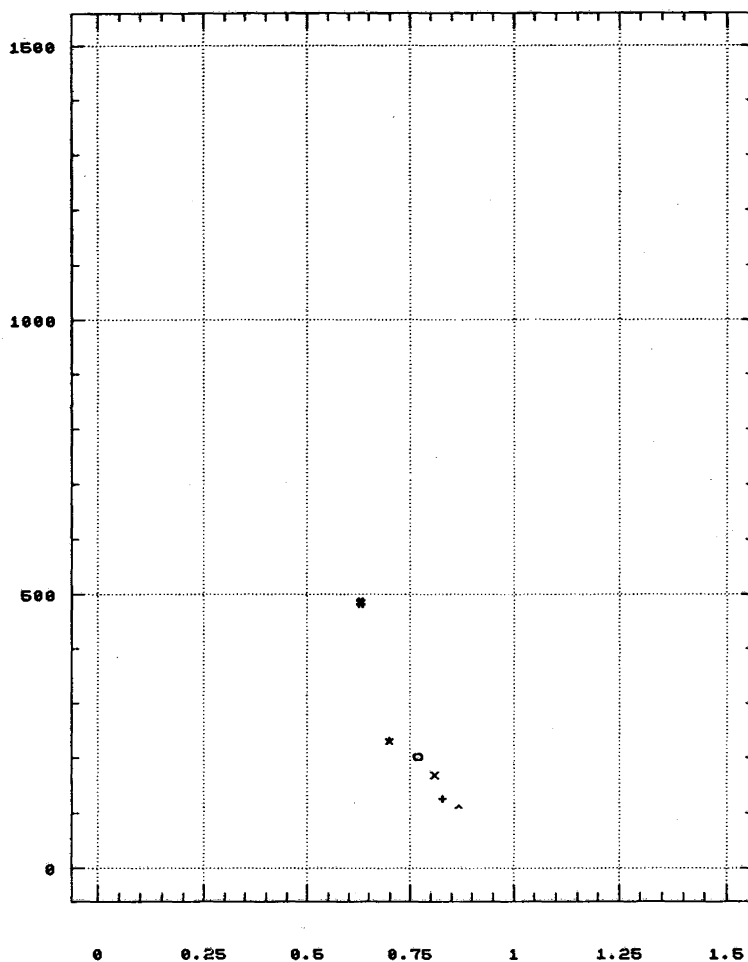
Otro posible factor de diferenciación a tener en cuenta es el carácter no aspirado y de bajo VOT (6,5 ms para [p], 10,4 ms para [t] y 25,7 ms para [k], según Castañeda 1986) de las oclusivas tensas del español, lo que las hace más próximas a las oclusivas sonoras en posición inicial del inglés que a las correspondientes sordas.

Con todo, a pesar de las diferencias, el dibujo que sale de la comparación de las ecuaciones de locus de las seis lenguas es

---

razones desconocidas. Con todo, es interesante hacer notar que la distribución de las pendientes en las oclusivas del inglés sigue siendo capaz de discriminar claramente los tres puntos de articulación.

bastante coherente, como se puede apreciar en las tres proyecciones siguientes:<sup>3</sup>



*Fig. 12. Espacio acústico labial.*

<sup>3</sup> En las Figs. 12, 13 y 14, '+' = español, '\*' = tai, '^' = inglés, '#' = sueco 'o' = árabe, 'x' = urdú.

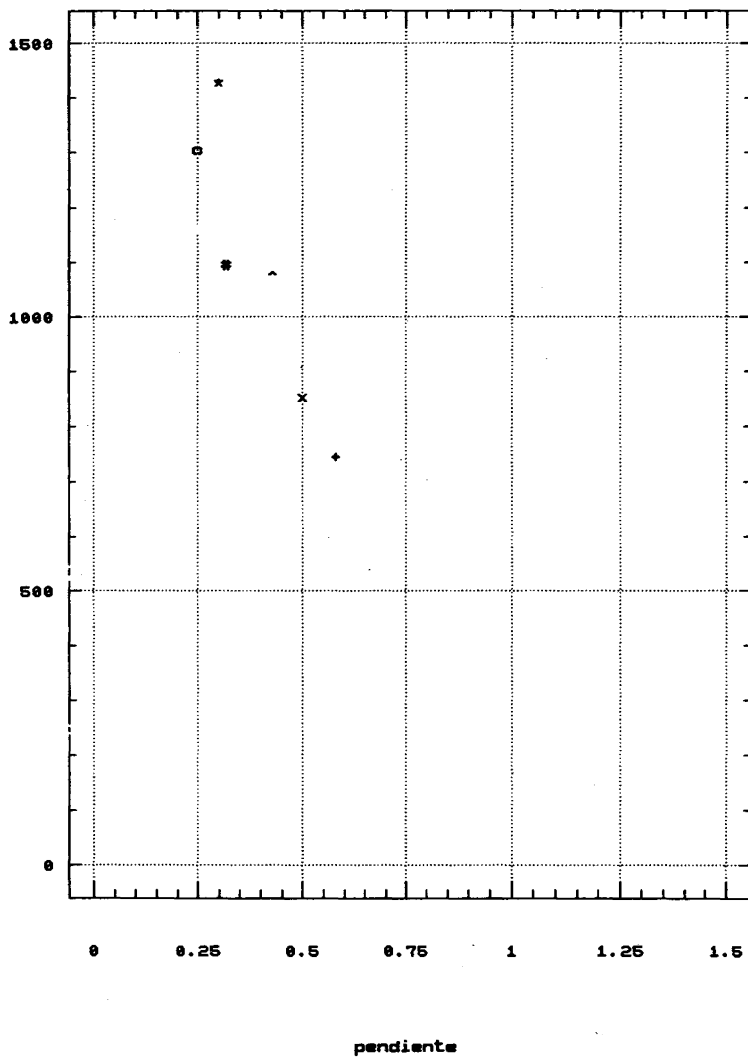


Fig. 13. Espacio acústico dental.

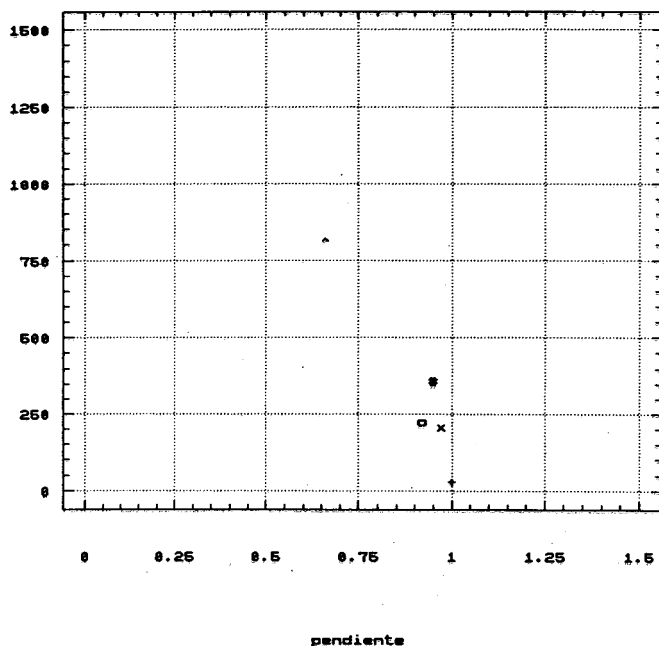


Fig. 14. Espacio acústico velar.

## 5. CONCLUSIONES

La principal conclusión que surge de este estudio es las ecuaciones de locus brinda un apoyo firme a la teoría de la invariación acústica para que siga siendo la solución más plausible al problema de la invariación del habla. Las ecuaciones de locus permiten describir y clasificar *a la perfección* las oclusivas del español según su punto de articulación a pesar de factores enmascaradores como el sexo del hablante o la coarticulación. Por último, los valores del español se muestran consistentes con los datos de otras lenguas, lo cual nos permite pensar que estamos realmente ante un invariante acústico y no ante un mero mecanismo *ad hoc*.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- BLUMSTEIN, S.E. & STEVENS, K.N. (1979): "Acoustic invariance in speech production", *JASA*, 66, pp. 1001-1017.
- CASTAÑEDA, M. L. (1986): "El VOT de las oclusivas sordas y sonoras españolas", *Estudios de Fonética Experimental*, II, pp. 91-110.
- KRULL, D. (1988): "Acoustic properties as predictors of perceptual responses", *PERILUS*, VII, pp. 66-70.
- KRULL, D. (1989): "Second formant locus patterns and coarticulation in spontaneous speech", *PERILUS*, X, pp. 87-108.
- LIBERMAN, A.M. y MATTINGLY, I.G. (1985): "The motor theory of speech revised", *Cognition*, 21, pp. 1-36.
- LIBERMAN, A.M., COOPER, F.S., SHANKWEILER, D.P. y STUDDERT-KENNEDY, M. (1967): "Perception of the speech code", *Psychological Review*, 74, pp. 431-461.
- LINDBLOM, B. (1963): "On vowel reduction", Stockholm, Speech Transmission Laboratory Report #29, The Royal Institute of Technology.
- MARTÍNEZ CELDRÁN, E. (1984): *Fonética*, Barcelona, Teide.
- NÚÑEZ-ROMERO, B. (1995): "Invariación acústica en las oclusivas del español", en este volumen.
- SUSSMAN, H. (1991): "The representation of stop consonants in three-dimensional acoustic space", *Phonetica*, vol. 48, pp. 18-31.
- SUSSMAN, H., MCCAFFREY, H.A., y MATTHEWS, S.A. (1991): "An investigation of locus equations as a source of relational invariance for stop place categorization", *JASA*, 90, pp. 1309-1325.

SUSSMAN, H., HOEMEKE, K.A., & AHMED, F. S. (1991): "A cross-linguistic investigation of locus equations as a phonetic descriptor for place of articulation", *JASA*, 94, pp. 1256-1268.

VILLALBA, X. (1995): "Los invariantes acústicos y el punto de articulación de las oclusivas en español", en este volumen.